

# 应用六西格玛提高钛合金超塑成形 / 扩散连接 产品合格率

## Improve SPF/DB Manufacture by Six Sigma

中航工业北京航空制造工程研究所 崔瑾 杨宇维 王兴华 王飞  
中国人民解放军驻沈飞公司军事代表室 李云飞

**[摘要]** 应用六西格玛提供的质量改进方法和统计分析工具,按照界定、测量、分析、改进、控制的步骤,运用 Pareto 图、因果图、过程能力分析、多元回归分析等多种工具,深入分析钛合金超塑成形 / 扩散连接产品制造过程中产生缺陷的根本原因并采取改进措施,有效提高了制造过程能力和产品合格率。

**关键词:** 六西格玛 超塑成形 / 扩散连接

**[ABSTRACT]** In accordance with the define, measure, analyze, improve, control steps of the six sigma method, the root reason of product defects in the titanium SPF/DB manufacturing process is in-depth analyzed and improved by using the statistical tools of Pareto chart, Cause-and-Effect, Capability analysis, Regression. Based on the six sigma method of titanium SPF/DB manufacturing process improvement, the rate of qualified products and production efficiency is effectively improved.

**Keywords:** Six sigma SPF/DB

六西格玛是一套系统的、集成的业务改进方法体系,是旨在持续改进企业业务流程,实现客户满意的管理方法<sup>[1]</sup>。它通过系统、集成地采用业务改进流程,实现无缺陷的过程设计,并对现有过程进行过程界定(Define)、测量(Measure)、分析(Analyze)、改进(Improve)、控制(Control),简称 DMAIC 流程(图 1),消除过程缺陷和无价值作业,从而提高质量和服务、降低成本、缩短运转周期,达到客户完全满意的结果,并增强企业竞争力。

六西格玛方法既适用于宏观和系统的流程,也适用于系统中的一个分支,甚至系统中微观的细小分支都可以使用这一套方法来实施流程的改进。

超塑成形 / 扩散连接(Superplastic Forming/Diffusion Bonding, SPF/DB)技术是近几十年兴起并快速发展的一种成形工艺。超塑成形是利用某些材料在特定条件下具有极好的变形能力这一特性而发展起来的一种成

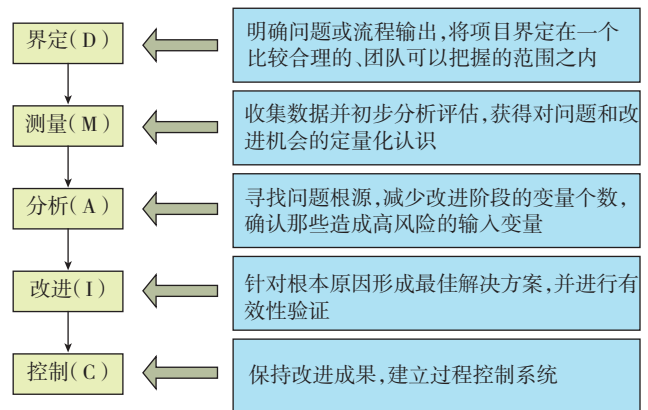


图1 DMAIC流程

Fig.1 Process for DMAIC

形工艺,扩散连接是利用被连接材料的表面在不足以引起塑性变形的压力和低于被连接工件熔点的温度条件下,使接触面通过原子间相互固态扩散而形成连接的方法。对于钛合金而言,材料的超塑成形温度和扩散连接温度接近,可以在一个热循环中完成成形和连接 2 个工艺过程,从而制造出复杂外形曲面、内筋加强的空心整体构件,在减轻飞行器结构重量、降低成本方面显示了极大的优越性,因而受到各国航空航天业高度重视<sup>[2]</sup>。

钛合金 SPF/DB 零件制造过程复杂、技术难度大,对人员、设备、材料、工艺、环境的要求很高,且影响质量的因素众多。借助六西格玛提供的方法和工具,可以从众多的因素中找到影响质量的关键因素,通过计算和试验找到其最佳取值范围,进而优化制造流程,减少零件缺陷,有效提高 SPF/DB 零件制造过程能力和产品合格率。

### 1 界定

本单位承担某种钛合金超塑成形 / 扩散连接零件制造任务,一个制造周期内共制造零件 48 件,其中 14 件存在缺陷,合格率为 70.8%,存在的缺陷类型为三角区鼓包、成形缺陷、三角区尺寸超差、扩散连接缺陷等。

为提高该种零件的制造合格率,单位成立了六西格玛项目团队,成员包括质量管理人员、技术人员、操作人员、检测人员等。

按照六西格玛 DMAIC 方法,界定阶段首先需要识别需求,明确要解决的问题。项目成员统计了生产周期内各种缺陷出现的次数,并对各种缺陷权重进行评估,从 0~10 分打分,形成该制造周期内 SPF/DB 零件的缺陷类型加权计算表(表 1),并根据计算数据做出缺陷类型加权 Pareto 图(图 2)。

图 2 显示,“三角区鼓包”(图 3)这一类型缺陷的加权频数占总缺陷的 67.3%,远大于其它类型的缺陷,由此判断“三角区鼓包”为 SPF/DB 零件质量影响最大的缺陷类型。因此,解决三角区鼓包的问题能够显著提

表1 一个制造周期内SPF/DB零件的缺陷类型加权计算表

缺陷类型	发生频数	权重	加权频数	累积加权缺陷数	比例 1%	累积比例 1%
三角区鼓包	9	8	72	72	67.3	67.3
成形缺陷	3	8	24	96	22.4	89.7
三角区尺寸超差	1	5	5	101	4.7	94.4
扩散连接缺陷	1	3	3	104	2.8	97.2
其他	1	3	3	107	2.8	100

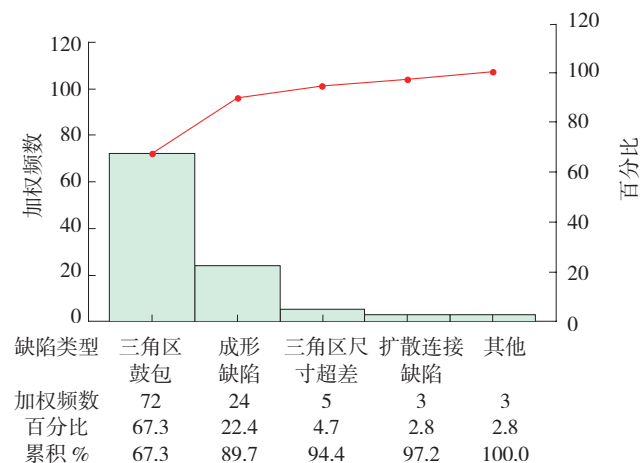


图2 SPF/DB零件的缺陷类型加权Pareto图

Fig.2 Pareto chart of objection type of SPF/DB Sample

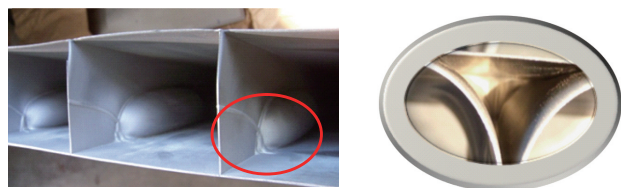


图3 三角区鼓包缺陷示意图

Fig.3 Diagram of objection of triangle zone bulge

高 SPF/DB 零件合格率。在后续各阶段的工作中,项目组将始终围绕这一缺陷类型开展分析和改进工作。

## 2 测量

在测量阶段,项目组计划进行测量系统评估、绘制流程图、初步找出导致零件缺陷的因素,同时收集数据,计算现阶段的过程能力作为改进的基础。

(1)进行测量系统评估。三角区鼓包的缺陷通过超声波无损检测查出,检测人员均具备相关资质,超声波检测仪也在检定有效期内。抽取一组零件,由不同检测人员进行多次检验,检测结果的重复性和再现性为 100%。由此验证了数据分析的结果真实可靠,测量系统可用。

(2)为了在测量系统可用的基础上全面分析造成缺陷的原因,项目团队对生产流程进行了重新梳理,绘制 SPF/DB 零件制造流程图,并据此组织团队讨论,用头脑风暴法全面检查零件制造各过程中可能影响质量的因素( $X$ ),在图 4 中标示出。

(3)对所有初步得出的各种影响因素进行梳理、筛选,对于一些比较稳定和不可改变的因素经团队成员集体讨论后进行了剔除,同时从人、机、料、法、环、测等方面进一步核查有无遗漏的因素并进行了整理绘制了因果图,见图 5。

团队成员在因果图中标注了需进一步收集数据的  $X$ ,并进行了编号,分别为:

- X1 模具状态(X1.1 气道深度、X1.2 气道宽度);
- X2 温控系统状态;
- X3 加热系统状态(X3.1 平台温度、X3.2 升温时间);
- X4 成形温度(X4.1 上模温度、X4.2 下模温度);
- X5 进气道尺寸。

以上 5 方面因素作为下一阶段的输入。

(4)计算测量阶段过程能力指数,定量地衡量现状,作为改进的基础。收集 34 件零件的缺陷情况数据并按制造顺序绘制时间序列图(图 6)。由图 6 中可见,34 件零件中存在“三角区鼓包”缺陷的共有 7 件,并不能明显识别出其的集中趋向性。

根据时间序列图计算过程能力,作为改进的基础。

·长期能力:

$$P_{(d)} = 1 - \text{FTY} = 1 - 27/34 = 0.20588, \text{查表得: } Z_{LT} = 0.80。$$

·短期能力指在质量较好的较短周期内过程达到的能力,从时间序列表看出,第 7~第 15 个零件连续合格,该段时间为整个生产周期中质量最佳的时段,其过程能力为短期能力。

$$P_{(d)} = 1/(9+2) = 0.09091, \text{查表得: } Z_{ST} = 1.35。$$

由此可见,短期技术能力较强,但长期表现不好,说

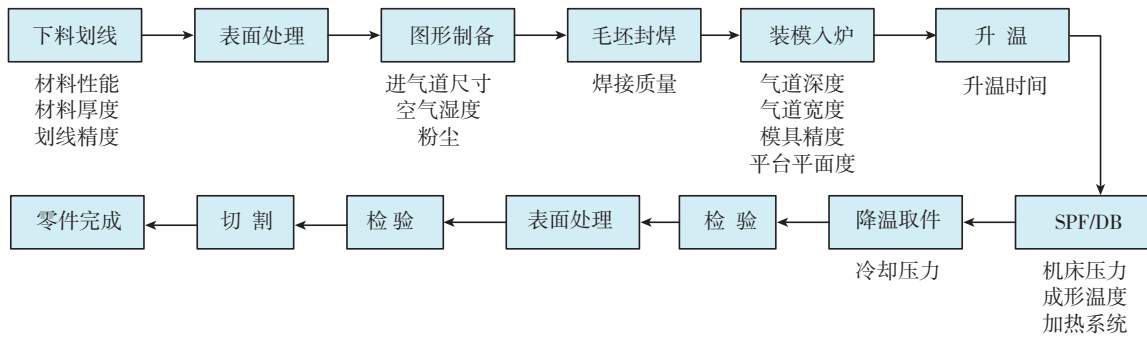


图4 SPF/DB零件制造流程图  
Fig.4 Flow chart for manufacture of SPF/DB part

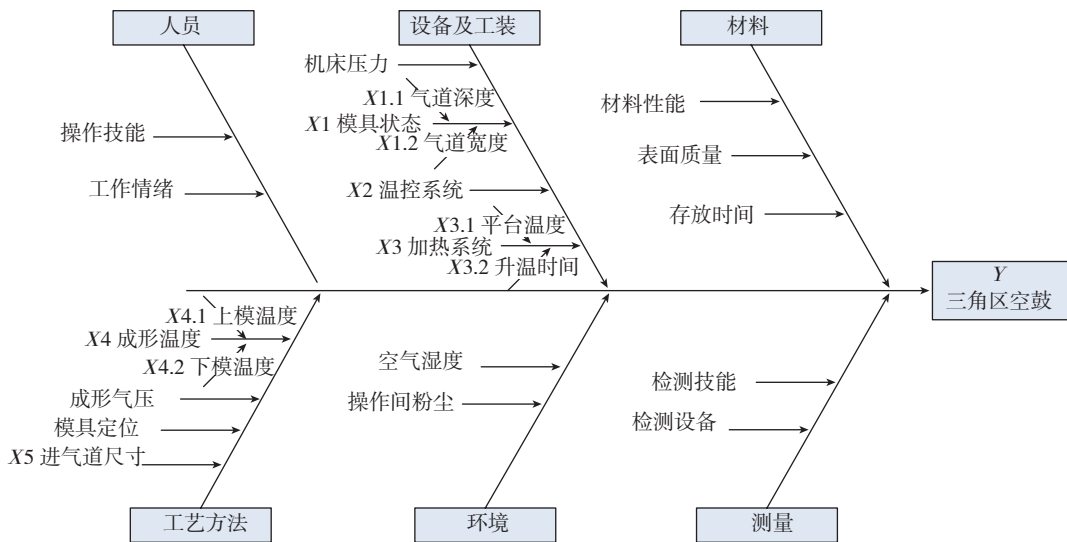


图5 缺陷因果图  
Fig.5 Cause-and-effect of objection

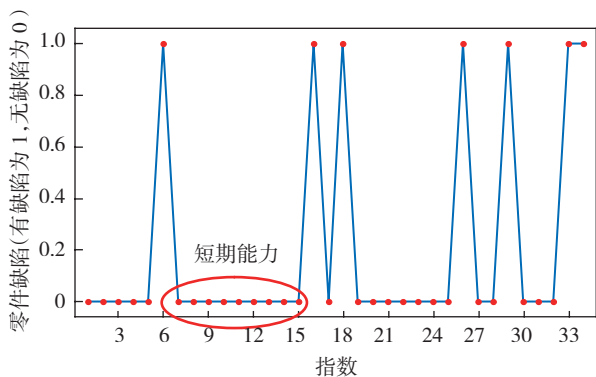


图6 SPF/DB零件缺陷时间序列图  
Fig.6 Sequence of objection time of SPF/DB part

明我们在制造工艺方面存在影响“三角区鼓包”缺陷的关键 X 没有得到很好的控制,只有找到关键 X 并对其进行稳定的控制才能从根本上解决该问题,提高合格率和生产能力水平。

### 3 分析

在测量阶段,项目团队已经初步确定了可能造成缺陷的 5 方面因素,本阶段项目组计划继续收集数据,根据历史数据与采集数据进行全面分析找出贡献率较大的因素,即影响产品质量的关键因素 X。

(1) 收集数据。项目团队根据初步确定的 5 方面因素策划数据收集内容。该项目的 Y (是否存在缺陷) 为可区分型数据,需要定义为:零件的三角区存在鼓包缺陷时, Y=1; 无缺陷时, Y=0。各项 X 为连续型或离散型数据,可以直接使用。团队成员按照策划内容收集到 50 组数据,其中 5 组见表 2。

(2) 利用二进制回归分析研究 Y 与 X1.1、X1.2、X2、X3.1、X3.2、X4.1、X4.2、X5 之间的关系,结果见表 3。

回归结果显示, X3.2 对应的 P 值为 0.007, 小于 0.05, 可以认为 X3.2 与 Y 具有统计方面显著的相关性,为了

表2 分析阶段收集的零件制造过程数据(仅列出部分数据作示意)

产品编号	是否存在缺陷	模具状态		温控系统	加热系统		成形温度		进气道尺寸
		气道深度	气道宽度		平台温度	升温时间	上模温度	下模温度	
Part No.	Y	X1.1	X1.2	X2	X3.1	X3.2	X4.1	X4.2	X5
B131	0	5	15	21	954	14.3	923	935	17
B132	0	4	15	71	948	14.8	915	920	14
B133	0	4	15	0	955	15	935	932	13
B134	0	4	15	0	948	14.3	915	925	14
B135	0	4	15	0	950	13.2	926	925	14

表3 Y与X1.1、X1.2、X2、X3.1、X3.2、X3.3、X4.1、X4.2、X5的Logistic回归表

自变量	系数	系数标准误差	Z	P	优势比	95% 置信区间	
						下限	上限
常量	9.84346	94.5544	0.1	0.917	/	/	/
X1.1 (2.5)	2.12561	2.12532	1	0.317	8.38	0.13	539.82
X2	-0.0923099	0.354904	-0.26	0.795	0.91	0.45	1.83
X3.1	0.0383573	0.0926043	0.41	0.679	1.04	0.87	1.25
X3.2	2.62722	0.971638	2.7	0.007	13.84	2.06	92.91
X3.3	-0.0343029	0.131672	-0.26	0.794	0.97	0.75	1.25
X4.1	-0.257309	0.138371	-1.86	0.063	0.77	0.59	1.01
X4.2	0.153745	0.103382	1.49	0.137	1.17	0.95	1.43
X5 (31)	-16.8321	28285	0	1	0	0	*
X5 (35)	-2.23952	2.09002	-1.07	0.284	0.11	0	6.4

表4 Y与X3.2拟合优度检验

方法	卡方	自由度	P
Pearson	21.9815	25	0.637
偏差	22.7302	25	0.593
Hosmer-Lemeshow	9.8367	8	0.277

进一步验证Y与X3.2拟合的置信度,进行Y与X3.2之间拟合优度检验,结果见表4。

拟合置信度P值为0.277,大于0.05,说明Y与X3.2的拟合置信度可接受。

以上分析得出,X3.2(升温时间)为影响零件质量的关键因素。

#### 4 改进

项目团队在改进阶段的任务是针对关键因素X3.2形成最佳解决方案,并且验证方案有效。通过前三个阶

段的工作,已经找到了引起缺陷的根本原因X3.2(升温时间),在改进阶段,进一步通过机理分析和概率统计建立该因素对Y影响的数学模型。

(1) 定量研究。

作出缺陷概率对X3.2的散点图,见图7。

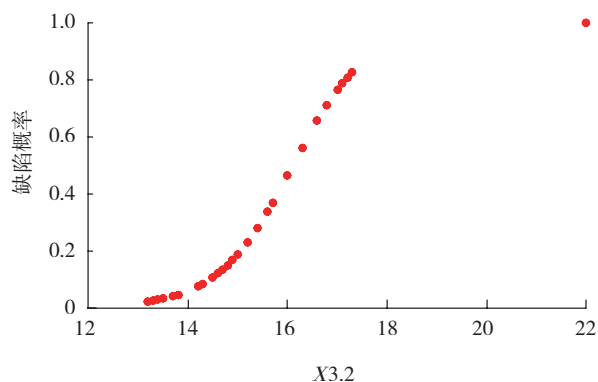


图7 缺陷概率对X3.2的散点图

Fig.7 Scatter diagram of objection probability to X32

在目前的生产条件下当缺陷概率在 20% 以下时为可接受范围,由此可推断 X3.2 取值在 13~15 之间,暂选取 X3.2 取值范围为 13~15 之间。

(2) 机理分析。

钛合金超塑成形/扩散连接温度为 900~930℃ 左右,升温时间过长,会导致板材在重力作用下蠕变,发生塌陷而局部粘连,形成三角区部位排气不畅,产生三角区鼓包现象。

(3) 工艺调整。

为减少升温时间、防止零件局部加热时间过长,采用分段加热法,这项措施可以减少总加热时间并避免零件板材局部温度过高而产生塌陷。工艺更改前后的升温时间如图 8 所示。

(4) 验证。

按照修改后的工艺制造零件 16 件,未出现三角区鼓包的缺陷。计算更改工艺前后过程能力并进行比较,

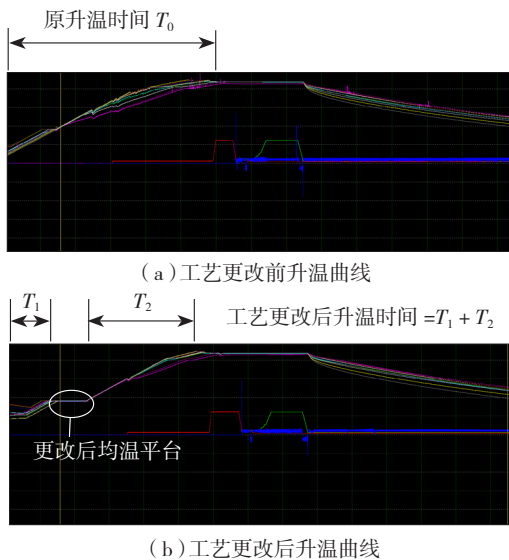


图8 工艺更改前后升温时间对比

Fig.8 Contrast of raising-temperature time before and after process changing

见图 9。

验证结果表明,工艺更改后的缺陷零件数减少,过程能力得到提高,改进措施起到了预期的效果。

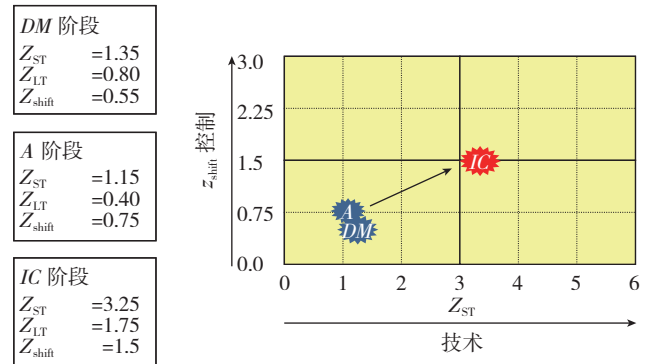


图9 工艺更改前后过程能力对比

Fig.9 Contrast of capability analysis before and after process changing

5 控制

至此项目团队已经完成了零件缺陷分析和改进措施,并进行了有效性验证。控制阶段的工作是保持改进成果,将优化后的升温工艺通过更改工艺规程和计算机软件设置的方式加以固化,并建立流程图(图 10)和过程控制计划,持续进行过程测量和控制。

6 结论

应用六西格玛提供的 DMAIC 方法和各种统计分析工具,能够有效改进钛合金超塑成形/扩散连接零件的制造质量,产品合格率由改进前的 70.8% 提高到改进后的 85.7%,降低了质量成本内部损失,获得顾客的好评。

参考文献

- [1] 马林,何桢.六西格玛管理(第2版).北京:中国人民大学出版社,2007.
- [2] 李志强,郭和平.超塑成形/扩散连接技术的应用进展和发展趋势.航空制造技术,2010(8): 32-35. (责编 亦非)

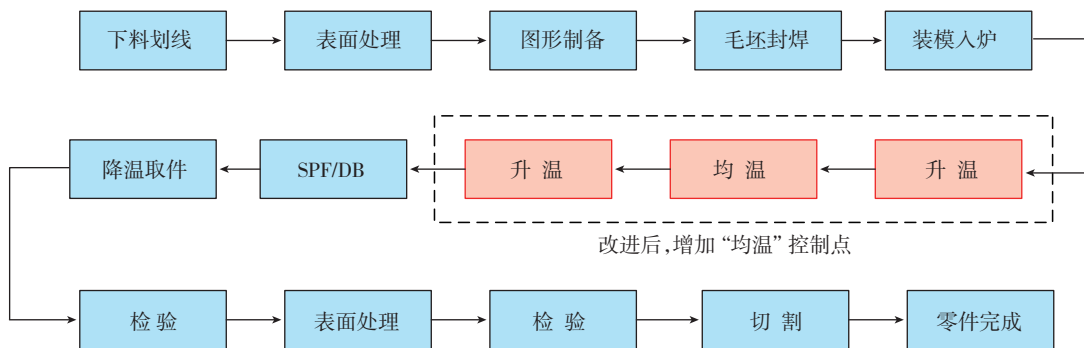


图10 改进工艺后的流程图

Fig.10 Flow chart of improved technics